

砂質土中の水分浸透に伴う熱伝導に関するカラム実験

岡山大学環境生命科学研究科 木本 和志
岡山大学環境生命科学研究科 岩崎 佳介
岡山大学環境生命科学研究科 市川 康明

1. はじめに

土中の熱流束は、土壌を構成する固体、水および空気間の熱伝導だけでなく、水分の浸透、蒸発、凝集によっても発生する。このことは、土中の熱流動やその結果としての温度分布には、土中水分の挙動と存在形態に関する情報が含まれることを意味する。地温測定は土中水分量や浸透流速の直接計測よりも容易であるため、地中の熱輸送状況を調べることにより水分浸透に関する情報が得られるようになれば、地盤や土壌の有効なモニタリング手法を開発できる可能性がある。しかしながら、熱媒体として土の性質は、土粒子と空隙および間隙水の構造により複雑に変化することが予想され、温度や熱流束を理論的に水分浸透速度等の量に換算することは必ずしも容易ではない。例えば、不飽和土の場合、飽和度の変化にとまぬ空隙部分の配置や形状が変化し、その結果、土の熱容量や熱伝導率も非定常に変化する。そのため、水分浸透と熱輸送の対応を理論的に明らかにするには、空隙構造が非定常に変化する多孔質媒体としての取扱いが必要となるが、空隙形状の複雑さや微細構造と解析対象領域に大きなスケール差があることから、理論解析はもとより数値解析にも困難が多い。以上の理由から、理論解析だけでなく、実験的に熱伝導と水分浸透の関係を調べることも必要であると言える。このような背景を踏まえ、本研究では、含水した砂質土における熱伝導の基本的特性を把握することを目的として、標準砂のカラム試験体を用いた室内実験を行った。本稿ではその実験概要と結果を示し、今回行ったカラム試験により得られた知見を報告する。

2. 実験概要

実験装置

温度計測実験に用いた装置の構成を図1に示す。実験装置は試料、断熱容器、ウォーターバス、熱電対およびデータロガーから構成される。試料には豊浦砂を用い、断熱容器はスタイロフォーム（押出発泡ポリスチレンフォーム）に矩形穴を穿孔し、一方の開口部をアルミシートで封じたものである。断熱容器には豊浦砂と熱電対アレイを入れ、試料を加熱する際には、断熱容器を水温を一定に保ったウォーターバスに浮かべて試料底部を加熱する。試料の加熱は乾燥状

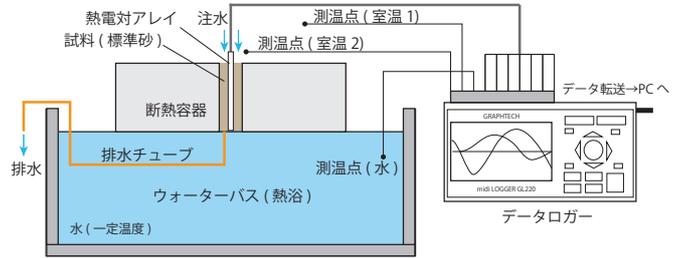


図1 実験装置の構成。

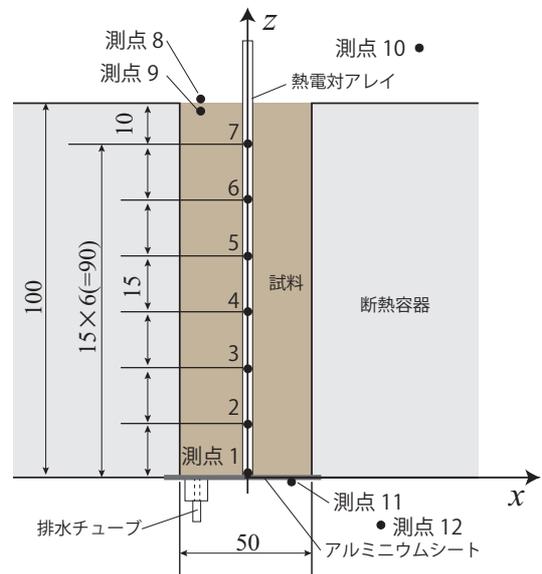


図2 試料サイズと測温点の配置。

態だけでなく、一定量の水を上部から滴下した状態でも行う。なお、断熱容器の底には排水チューブを設置し、チューブ端を開閉することで、滴下した水を湛水させることや排水を行うことができるようにしてある。試料内部温度の計測には、防水加工されたK型熱電対を図2のように配置し、データロガー (Graphtech, midi LOGGER GL220) で温度時刻歴を計測する。計測したデータはパソコンに転送し、詳細な解析を行う。

実験手順

供試体の加熱と注排水は、以下の4段階に分けて行う。

- 第1段階: 乾燥試料を熱電対アレイとともに断熱容器に詰め、試料内部が室温程度となるまで静置する。その後、断熱容器を水温40度に設定したウォーター

バスに浮かべ、試料底部から加熱する。温度計測は加熱と同時に開始し、温度場が定常状態に達するまで1秒間隔で行う。

- 第2段階: 定常状態にある乾燥試料に、試料上面から一定流量、室温程度の水道水をペリスタポンプを用いて滴下する。このとき、排水チューブは閉栓し、試料が完全に飽和するまで注水を継続する。
- 第3段階: 試料が完全に飽和させて、注水停止した時点から、容器をウォーターバスに載せたまま試料内部温度が定常状態になるまで温度計測を行う。
- 第4段階: 定常な温度場が形成され飽和状態にある試料に対し、排水チューブを開栓して排水を行う。同時に、第二段階と同じ条件で注水を再開する。温度計測は、注排水開始から温度が定常状態に達するまで行う。

3. 実験結果

第1段階

試料内部の測点で得られた温度の時刻歴を図3に示す。供試体底部 ($z=0\text{mm}$) では、実験開始後ただちに温度が上昇し、100分程度でほぼ平衡状態に達している。それ以外の測点では、底面からの距離が離れるにつれて応答が遅れ、温度上昇幅も小さくなるが、いずれの点も5時間程度経過した時点での温度上昇は非常に緩慢となったため、定常状態に達したと判断し第一段階を終了とした。なお、 $z=90\text{mm}$ の点における温度が振動しているのは、空調による室温変化を反映したものである。なお、室温、湯温(熱浴の水温)、試験体上下面温度の時刻歴は図5に示したようであり、試験体上面の表層部に近い程、室温変化の影響を強く受けることが分かる。

図3に示したデータの一部を、横軸に温度、縦軸に測点の z 座標をとってプロットすれば、試料鉛直方向の温度プロファイルとして示すことができる。図4は、第一段階開始から終了まで5つの時間における温度プロファイルを示したものである。 z 座標の小さい側から順次温度が上昇し、最終的にはほぼ直線的な分布になることが分かる。このことは、スタイロフォームにより側面が効果的に断熱され、カラム長手方向に1次元的な熱伝導場が形成されていることを意味する。ただし、 $z=0\text{mm}$ における温度が最終的に熱浴温度である40程度となるのに対し、カラム上表面近傍($z=100\text{mm}$)では、試料温度は室温に比べて振れ幅が小さく、両者は一致しないことが分かる。このことは、数値シミュレーションを行うにあたり、境界付近か内部で計測し

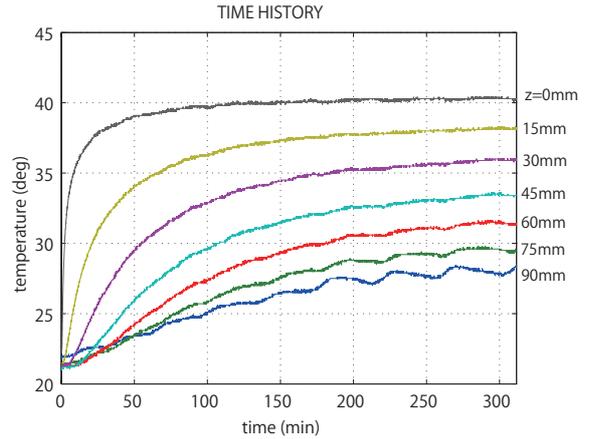


図3 供試体内部温度の時刻歴(第1段階)。

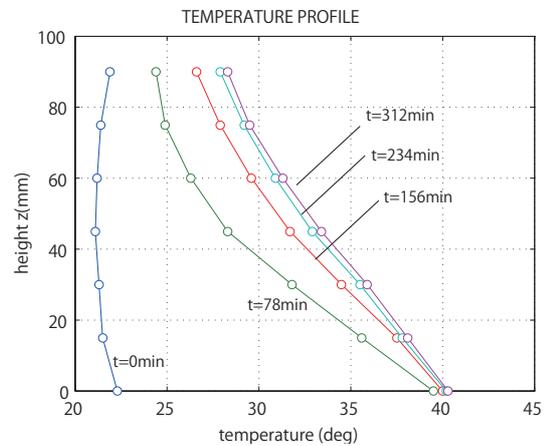


図4 供試体内部温度の深度分布(第1段階)。

た温度データを境界条件として用いることが簡便であろうことを示唆している。

第2段階

加熱により平衡状態となった乾燥試料に、ペリスタポンプを用いて2流路、流速 5.8ml/min で室温程度の水道水を滴下したときの、試料内部温度の時刻歴を図6に示す。この段階では、注水中、排水チューブ端を閉栓しているため、供試体底部に到達した水はそのまま滞り飽和域が次第に拡大する。その後、カラム全体が飽和したことが視認された時点で第2段階の実験を終了とした。図6に示した温度の時刻歴には、各測点に水分が到達した時点から、順次温度低下が起きる様子がみとれる。なお、注水開始時刻から供試体底面における温度低下の開始までに7分程度を要していることから、浸透速度はおよそ 0.24mm/sec 程度と見積もられる。ただし、供試体全体が飽和するまでに要する時間は、実験を終了した16.6分であるため、ここで言う浸透

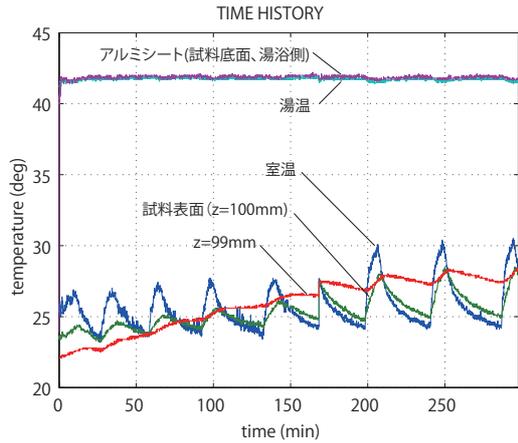


図5 室温、湯温および試験体上下面における温度の時刻歴(第1段階).

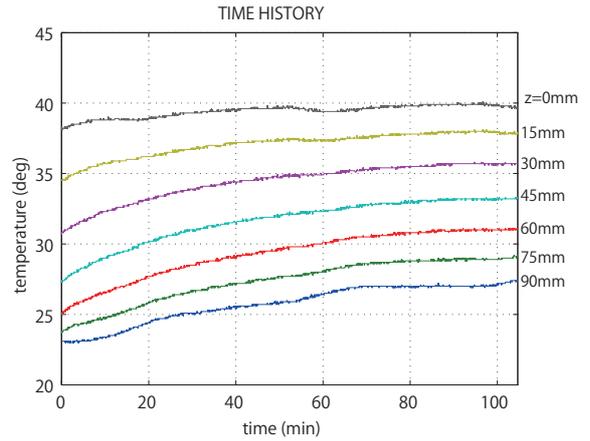


図7 供試体内部温度の時刻歴(第3段階).

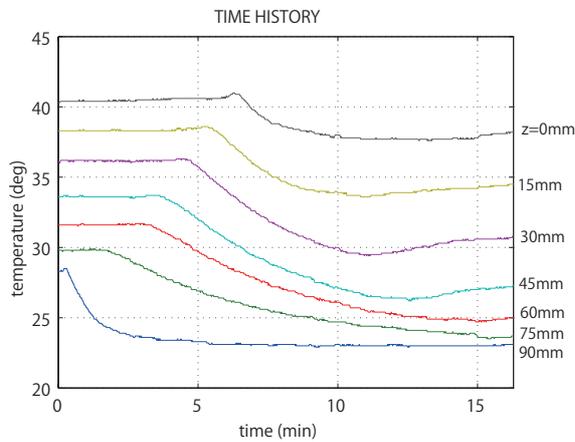


図6 供試体内部温度の時刻歴(第2段階).

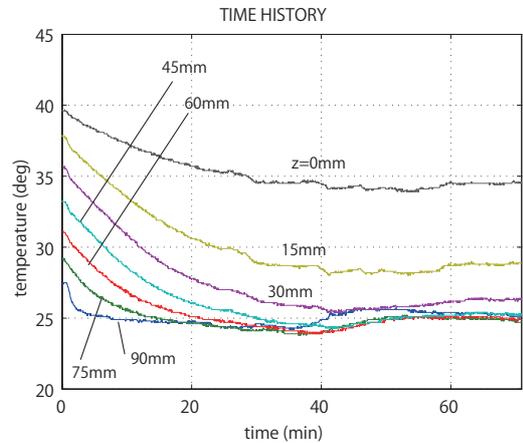


図8 供試体内部温度の時刻歴(第4段階).

速度とは不飽和領域のフロントがどの程度の速度で進展したかの概算値と解釈すべきと言える。

第3段階

第3段階は、注水により試料が飽和するまでの間に低下した温度が、再び直線的なプロファイルに回復する過程であり、その温度履歴は図7のようであった。ここでも、試料上面の側($z=90\text{mm}$)では室温変化の影響を受け、緩やかに振動しているが、いずれの測点でも温度は単調に高温側へ回復していく様子が現れている。

第4段階

第4段階における試料内部温度の時刻歴を図8に、深度分布を図9に示す。温度時刻歴のグラフに示される通り、この段階では試料内部は透水に伴い冷却されるが、試料上部では室温の変化により、40分を経過したあたりで若干の温度上昇が見られ、深度方向に見た温度勾配が単調で無く

なっている。このことは、温度プロファイルが試験体上面でなく、内部において極小値をとるという形で現れる。ただし、定常状態における温度プロファイルは、試験体底部に向けて急なカーブを描き、1次元移流-拡散方程式に対する定常解の典型的な形を示している。ところで、試験体上端は室温程度で、逆に、底部では35度程度と熱浴温度よりも低い。このことは、室温と水温だけを所与として温度解析を行うには、供試体上部をディリクレ、底部をノイマンあるいはロビン境界条件として扱う必要があることを示唆している。

4. 熱伝導率と移流速度の推定

本研究で得られた実験結果を、1次元熱伝導問題の数値解と比較することにより、熱伝導率および移流速度の推定を行う。

位置 z 、時刻 t における砂試料の温度を $T(z, t)$ とすれば、熱量保存則と熱伝導に関するフーリエの法則より、一次元

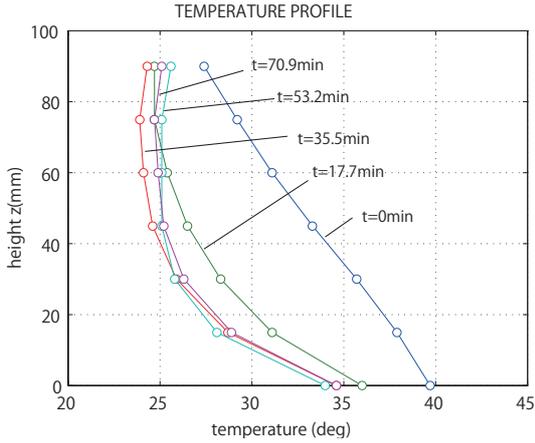


図9 供試体内部温度の空間分布 (第4段階).

熱伝導方程式は

$$\rho c \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (1)$$

と表される．ただし， ρ は密度， c は比熱， λ は熱伝導率， v は移流速度を意味し，いずれも砂試料を均質な連続体とみなした場合の巨視的量を表す．なお，試料の熱容量 $C = \rho c$ は，豊浦砂の主要構成鉱物が石英であるため，石英の熱容量と試料の間隙率 n ，飽和度 S から次の式で求められる．

$$C = \rho_s c_s (1 - n) + \rho_w c_w S n \quad (2)$$

ただし， ρ_s, ρ_w は石英および水の密度を， c_s, c_w は石英と水の比熱を意味する．これらの値は

$$c_s = 0.7 [\text{J/g} \cdot \text{K}], \quad \rho_s = 2.64 [\text{g/cm}^3]$$

$$c_w = 4.2 [\text{J/g} \cdot \text{K}], \quad \rho_w = 1.00 [\text{g/cm}^3]$$

であり，試料の空隙率が $n=0.376$ であったことから，乾燥砂の熱容量 C_{dry} と飽和試料の熱容量 C_{sat} はそれぞれ

$$C_{dry} = 1.25, \quad C_{sat} = 2.62 [\text{J/cm}^3 \text{K}]$$

となる．これらの熱容量の値を用い，式(1)の数値解と計測結果を比較することで，熱伝導率 λ と移流速度 v を求める．なお，式(1)を解く際の境界条件は，測点1(試料底部)と測点7(試料頂部付近)で得られた温度データを用いる．また，数値解と計測値の残差 r を

$$r := \frac{\int_0^{t_{end}} \sum_{i=2}^6 |T(x_i, t) - T_i(t)| dt}{\int_0^{t_{end}} \sum_{i=2}^6 |T_i(t) - T_0(0)| dt} \quad (3)$$

で定義し， r を最小化するように λ および v を決定する．ただし， T は式(1)の数値解を， T_i は第 i 番目の測点における計測温度を， T_0 は室温を表し， t_{end} は計測時間長を意味する．

温度 $T_i(t)$ に，第1段階の計測で得られた温度を用いて残差の計算と最小化を行うことで，乾燥砂の熱伝導率 λ_{dry} を，第3段階の結果を用いることで飽和試料の熱伝導率 λ_{sat} を求める．最後に， λ_{sat} と第4段階の計測結果を用いて，第4段階における移流速度 v の推定を行った．その結果をまとめると次のようになる．

$$\lambda_{dry} = 0.375 [\text{W/m} \cdot \text{K}], \quad (r = 0.015)$$

$$\lambda_{sat} = 2.25 [\text{W/m} \cdot \text{K}], \quad (r = 0.012)$$

$$v = 0.060 [\text{mm/sec}], \quad (r = 0.030)$$

以上より，乾燥砂と飽和砂の熱伝導率はおよそ1オーダー程度変化することが分かる．またこれらの熱伝導率の推定において残差は約1~2%程度と良好な結果が得られている．一方，移流速度の推定においては残差 r は若干大きな値となるが， $r = 3\%$ と十分許容しうる程度と思われる．なお，第4段階における注水流量 Q は 5.8 ml/sec の一定であるので，試料の断面積 A を用いて浸透流速 V を計算すると

$$V = \frac{Q}{nA} = 0.119 [\text{mm/sec}]$$

となり，推定された移流速度のおよそ2倍程度である．この差は，移流による熱輸送が水の熱容量と移流速度に比例するのに対し，上の係数同定において飽和砂の熱容量 C_{sat} を式(1)の物質導関数の係数となるように括りだす形で移流速度 v を定義したためである．実際， C_{sat} に占める水の熱容量の割合 η は

$$\eta = \frac{C_{sat} - C_{dry}}{C_{sat}} = 0.52$$

であるから，この値を用いて移流速度 v を浸透流速 v' に換算すると

$$v' = \frac{v}{\eta} = 0.115 [\text{mm/sec}]$$

と，ほぼ実験値に一致する．

5. まとめ

豊浦砂を用いたカラム試験を行い，乾燥砂および飽和砂の熱伝導率の推定を行った．その結果，飽和砂の熱伝導率は，乾燥砂のそれよりも約一桁大きく，飽和度の違いによる影響が大きいことが確認された．また，一定流量で飽和砂に通水しながら試料内部温度を計測したところ，温度変化のデータから浸透流速を推定できることが分かった．今後は，不飽和領域の熱的な挙動を詳しく調べるとともに，多次元モデルによる数値シミュレーションを行い，温度と水分挙動の関係を明確にすることが課題となる．